

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN-CORROSIÓN DE LOS  
IMPULSORES DE UNA BOMBA WEMCO RECUBIERTOS POR ROCIADO  
TÉRMICO**

**JEAN PIERRE GRANOBLER URBANO**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
SANTIAGO DE CALI  
2013**

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN-CORROSIÓN DE LOS  
IMPULSORES DE UNA BOMBA WEMCO RECUBIERTOS POR ROCIADO  
TÉRMICO**

**JEAN PIERRE GRANOBLER URBANO**

**Pasantía de investigación para optar por título de Ingeniero Mecánico**

**DIRECTOR  
NELLY CECILIA ALBA DE SÁNCHEZ  
Doctora en Ciencias Física**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
SANTIAGO DE CALI  
2013**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado en  
cumplimiento de los requisitos  
exigidos por la Universidad  
Autónoma de Occidente para optar al  
título de Ingeniero Mecánico**

**JULIO CESAR CAICEDO**

**Jurado**

**HÉCTOR JARAMILLO**

**Jurado**

**Santiago de Cali, 20 de Enero de 2013**

Por supuesto que a Dios, ante todo sin su ayuda nada de esto sería posible; en segundo lugar a mis padres, por brindarme su apoyo incondicional incluso en los momentos más difíciles. A mi hermano que juntos lograremos grandes metas porque compartimos los mismos sueños.

A mi novia, gracias por escucharme siempre en mis momentos difíciles. Y por último pero no menos importante a mí, por tener fuerza y perseverancia a lo largo de mi carrera y la vida, y así culminar uno de mis más grandes anhelos el ser Ingeniero Mecánico. Ahora mentalizado en mi próxima meta, la Maestría.

Quiero incluir dentro de mis dedicatorias, y en un lugar especial, a todos los Profesores que me brindaron una mano amiga del Colegio, de la Escuela de Aviación, que me aportaron para convertirme en el profesional que hoy en día soy, y principalmente a esta Universidad me permitió ingresar a sus aulas y me entregó una formación profesional que llevaré con mucho orgullo durante el resto de mi vida. Gracias UAO

## **AGRADECIMIENTOS**

Me complace reconocer de forma muy especial a mis tutores, la Profesora Ingeniera Nelly Cecilia Alba de Sánchez, y el Profesor Faber Correa, quienes siempre supieron guiarme hacia la solución de los problemas que se me presentaban en la elaboración de un trabajo como este. Sinceramente gracias, por brindarme todo su apoyo, regalarme día a día una parte de su tiempo y entregarme siempre un consejo que me inspirara a seguir adelante.

Quiero también agradecer al Profesor Ingeniero Julio Cesar Caicedo, de la Escuela de Materiales de la Universidad del Valle, quien me brindó toda la colaboración para llevar a cabo la comprensión del mecanismo de desgaste.

Un agradecimiento muy especial para el profesor William Aperador de la Universidad Militar de Colombia por brindarnos la ayuda necesaria para la realización de nuestro trabajo,

Muchas gracias al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, CENM, a través del Dr. Pedro Prieto quien nos permitió el uso de los equipos, nos ayudaron en la preparación de las muestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. A los auxiliares de los laboratorios de la Universidad Autónoma de Occidente, quienes nos permitieron el uso de los equipos para el tamizado de las arenas y nos ayudaron en la preparación de las muestras para realizar la microscopía óptica.

Al Ing. Mauricio Patiño, asesor comercial de la empresa Sager SA, quien puso a nuestra disposición toda la ayuda que pudiéramos requerir y se mantuvo siempre en contacto con nosotros. Al Ing. Ricardo López, del Ingenio Manuelita S.A., quien nos ayudó a la adquisición de los impulsores con lo que se pudo analizar la mecánica de desgaste.

Gracias por siempre, a mi familia, compañeros y amigos que me impulsaron a seguir adelante en los momentos difíciles durante este trabajo así como durante toda la carrera, de no ser por Uds. no estaría hoy en el lugar que estoy.

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>12</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>14</b>
<b>2. JUSTIFICACION</b>	<b>15</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>3.1. OBJETIVO GENERAL</b>	<b>16</b>
<b>3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>16</b>
<b>4. MARCO TEORICO</b>	<b>17</b>
<b>4.1. ROCIADO TÉRMICO</b>	<b>17</b>
<b>4.2. ROCIADO TÉRMICO POR COMBUSTIÓN</b>	<b>17</b>
<b>4.2.1. Subsónica</b>	<b>17</b>
<b>4.2.2. Hipersónica</b>	<b>17</b>
<b>4.3. ROCIADO TÉRMICO POR ARCO ELÉCTRICO</b>	<b>18</b>
<b>4.4. ROCIADO TÉRMICO POR MEDIO DE PISTOLA DE PLASMA</b>	<b>18</b>
<b>4.4.1. Plasma transferido</b>	<b>18</b>
<b>4.4.2. Plasma no transferido</b>	<b>18</b>
<b>4.5. PROCESO DE EUTALLOY</b>	<b>19</b>
<b>4.6. PARÁMETROS DEL PROCESO EUTALLOY</b>	<b>19</b>
<b>4.7. RECUBRIMIENTO</b>	<b>22</b>
<b>4.8. DESGASTE</b>	<b>22</b>
<b>4.8.1. Corrosivo</b>	<b>23</b>
<b>4.8.2. Erosivo</b>	<b>23</b>
<b>5. DETALLES EXPERIMENTALES</b>	<b>25</b>
<b>5.1. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE PARA LA REALIZACIÓN DEL ROCIADO TÉRMICO</b>	<b>25</b>
<b>5.2. PARÁMETROS DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO</b>	<b>25</b>
<b>5.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS</b>	<b>26</b>
<b>5.3.1. Preparación de las muestras para la microscopía</b>	<b>27</b>
<b>5.3.2. Microscopía óptica</b>	<b>28</b>
<b>5.3.3. Microscopía electrónica</b>	<b>29</b>
<b>5.3.4. Microdureza</b>	<b>29</b>
<b>5.3.5. Rugosidad</b>	<b>30</b>
<b>5.3.6. Prueba de rayado</b>	<b>30</b>
<b>5.3.7. Ensayo de erosión – corrosión</b>	<b>31</b>

5.3.7.1. Prueba de granulometría	32
5.3.7.2. Parámetros para ejecución del ensayo	34
6. ANALISIS DE RESULTADOS	36
6.1. ANÁLISIS MICROSCOPIA ÓPTICO	36
6.2. RESULTADOS MICRO DUREZA VICKERS	37
6.3. RESULTADOS PRUEBA DE RAYADO	38
6.4. RESULTADOS ENSAYO EROSIÓN-CORROSIÓN	40
6.5. ANÁLISIS MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	46
7. CONCLUSIONES	49
8. PERSPECTIVAS	50
BIBLIOGRAFIA	51

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1. Aleaciones metálicas</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 2. Aleaciones cerámicas</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 3. Cermets</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 4. Carburos</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 5. Parámetros del proceso de rociado térmica</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 6. Resultados de análisis de granulometría</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 8. Resultados de análisis de Finura</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 9. Pérdida de masa a 3 horas del ensayo con ángulo de impacto de 90°</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 10. Rugosidad a 3 horas del ensayo con ángulo de impacto de 90°</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 11. Pérdida de masa a 2 horas de ensayo con ángulo de impacto de 45°</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 12. Rugosidad a 2 horas de ensayo con ángulo de impacto de 45°</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 13. Pérdida de masa a 2 horas de ensayo con ángulo de impacto de 30°</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 14. Rugosidad a 2 horas de ensayo con ángulo de impacto de 30°</b>	<b>44</b>



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. a. Impulsor nuevo b. Impulsor desgastado	13
Figura 2. Disposición de la bomba Wemco	15
Figura 3. Equipo por arco eléctrico	18
Figura 4. Equipo de aspersión y fusión a Gas (Spray & Fuse)	19
Figura 5. Torno inmotor súper 30 – 550 laboratorio de manufactura UAO	25
Figura 6. Proceso de rociado térmico	26
Figura 7. Probeta de acero AISI 316 recubierta con CPE 5057.	26
Figura 8. Cortadora de precisión, laboratorio UAO.	27
Figura 9. a. Maquina montadora de probetas, laboratorio UAO. b. Probeta montadas en baquelita.	27
Figura 10. Equipo de desbaste y pulidora, laboratorio UAO.	28
Figura 11. Microscopio óptico, laboratorio UAO.	28
Figura 12. Microscopio electrónico de barrido.	29
Figura 13. Micro-durómetro, laboratorio, UAO.	29
Figura 14. Rugosímetro, laboratorio UAO.	30
Figura 15. Equipo de pruebas de rayado, laboratorio GCIM. UAO.	30
Figura 16. Equipo de ensayo erosivo, Laboratorio GCIM, UAO.	31
Figura 17. Equipo de ultrasonido, laboratorio GCIM. UAO.	31
Figura 18. Balanza analítica, laboratorio GCIM. UAO.	32
Figura 19. Maquina tamizadora de arena, Laboratorio UAO.	33
Figura 20. Resultados de análisis de granulometría	34

<b>Figura 21. Micrografías de los recubrimientos CPE 5057 sobre acero AISI 316 a 10x</b>	<b>36</b>
<b>Figura 22. Micrografía de un poro a 10x</b>	<b>36</b>
<b>Figura 23. Micrografías del recubrimiento a. 5x b. recubrimiento a 10x</b>	<b>37</b>
<b>Figura 24. a. Micrografía de una grieta en el recubrimiento a 5x b. Micrografía de una grieta en el sustrato a 5x</b>	<b>37</b>
<b>Figura 25 Grafica de coeficiente de rozamiento versus carga aplicada en la prueba de rayado</b>	<b>38</b>
<b>Figura 26. Micrografía de la huellas sobre el recubrimiento depositado sobre acero AISI 316 evidenciado falla cohesiva</b>	<b>38</b>
<b>Figura 27. Micrografía de la huellas de rayado sobre el recubrimiento depositado sobre acero AISI 316</b>	<b>39</b>
<b>Figura 28. Micrografía de la huellas sobre el recubrimiento depositado sobre sustrato de acero AISI 316 evidenciado grietas.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 29. Pérdida de masa a 3 horas de ensayo y 90° de impacto</b>	<b>40</b>
<b>Figura 30. Pérdida de masa a 2 horas de ensayo y 45° de impacto</b>	<b>42</b>
<b>Figura 31. Pérdida de masa a 2 horas de ensayo y 30° de impacto</b>	<b>43</b>
<b>Figura 32. Pérdida de masa, Laboratorio GCIM, UAO</b>	<b>44</b>
<b>Figura 33. Pérdida de masa. Laboratorio U. Militar de Colombia</b>	<b>45</b>
<b>Figura 34. Curvas de polarización dinámicas del ensayo de corrosión y corrosión-erosión con ángulo de impacto de 90°</b>	<b>46</b>
<b>Figura 35. Micrografía del recubrimiento a 30° en tiempo de 2 horas de impacto</b>	<b>47</b>
<b>Figura 36. Micrografía del acero AISI 316 a 30° en tiempo de 2 horas de impacto</b>	<b>47</b>
<b>Figura 37. Micrografías del recubrimiento a 90° en tiempo de 3 horas de impactos</b>	<b>48</b>

## RESUMEN

Se caracterizaron propiedades mecánicas, morfológicas y tribológicas, del acero AISI 316 del cual se fabrican los impulsores de las bombas Wemco. El análisis se realizó al material en estado de suministro y con recubrimiento de carburos de tungsteno depositado por medio del proceso eutalloy el cual se llevó a cabo en la empresa Sager S.A.

Una vez realizada la deposición del recubrimiento, se procedió a realizar los ensayos de erosión-corrosión y corrosión. Se realizaron ensayos de erosión-corrosión en un equipo patentado por la Universidad Autónoma, con ángulos de impacto de 30, 45 y 90° y tiempos de proceso de 3 y de 2 horas por probeta en una solución  $\frac{1}{2}$  M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 3.5%NaCl + 30% de peso en Sílice.

También se realizaron pruebas de erosión corrosión dinámica en un equipo Erosión-Corrosión de la universidad Militar de Colombia. Las probetas se impactaron a ángulo de 90° a 23 horas de proceso, al comparar los resultados, el comportamiento de la resistencia a la erosión-corrosión fue similar. El Acero en estado de suministro debido a los impactos recibidos presentó alta deformación plástica por lo tanto presentó menor pérdida de masa lo que implica una mayor resistencia al desgaste erosivo-corrosivo, mientras que las probetas con recubrimiento presentaron mayor pérdida de masa en la primera hora del análisis y a partir de este momento tuvo un comportamiento similar al del acero sin recubrimiento.

Para la caracterización de la respuesta corrosiva se usó la técnica con curvas de polarización dinámicas Tafel, la caracterización microestructural mediante microscopia electrónica de barrido (MEB) y microscopia óptica.

El estudio mostró que es favorable aplicar el recubrimiento de carburos de tungsteno en los impulsores de las bombas Wemco del Ingenio Manuelita porque permitirá conservar más tiempo la geometría de diseño del álabe y esto a su vez, aumentará su vida útil.

**Palabras claves:** rociado térmico, corrosión, erosión, recubrimiento,

## INTRODUCCIÓN

En la industria regional cuando un componente mecánico ha sufrido desgaste por efecto de su trabajo, en ocasiones se acude a la reparación de la zona desgastada por medio de soldadura y de la metalización y se recupera la pieza. Tanto en el proceso de soldadura como de metalización, se aplica un recubrimiento resistente al desgaste que evitará que la pieza se deteriore nuevamente en esa zona en el mismo tiempo, es decir aumentará su vida útil.

Una de las aplicaciones de metalización es mediante la técnica de rociado térmico (Thermal Spray), que se ha implementado rápidamente en la industria metalmeccánica, debido a su fácil manejo y buenos resultados obtenidos. Una de las empresas líderes en aplicación de esta técnica es Sager S.A., la cual es una empresa distribuidora de la marca Eutectic-Castolin, empresa multinacional fabricante de equipos de soldadura y equipos de rociado térmico entre otros. Sager S.A. actualmente presta el servicio de mantenimiento correctivo de equipos de la industria a nivel nacional y entre sus clientes se incluye el Ingenio Manuelita S.A, que utiliza en sus procesos bombas centrífugas Wemco para transportar el jugo crudo de la caña de azúcar. Estas bombas están presentando alto desgaste en sus impulsores, tal como se observa en la Figura 1, debido al ataque químico producido por ácidos del jugo de la caña y sólidos en suspensión como; bagazo, lodos y pequeñas piedras, esto genera un efecto erosivo-corrosivo que afecta la eficiencia del proceso y consecuentemente, la productividad de la empresa.

Para la realización del presente proyecto se ha llevado a cabo un proyecto de investigación entre la empresa Sager S.A. y la Universidad Autónoma de Occidente por medio del Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales, GCIM, de, para presentar una propuesta para mejorar la vida útil de los impulsores. Sager S.A. realizará el revestimiento a probetas de acero inoxidable AISI 316, material del cual están fabricadas los impulsores de las bombas Wemco, con recubrimientos de la aleación de tungsteno en forma de polvo, mediante el proceso eutalloy (aplicación de rociado térmico desarrollado por la empresa Eutectic-Castolin), para determinar su comportamiento frente a procesos de erosión-corrosión.

**Figura 1. Impulsor de la bomba Wemco a. Impulsor nuevo b. Impulsor desgastado**



## 1. ANTECEDENTES

El desgaste por erosión comenzó a ser un inconveniente hace mucho tiempo, convirtiéndose en un gran problema para la industria, este proceso actúa en forma de partículas duras que chocan contra una superficie generando reducción de la vida útil de sus elementos mecánicos, en algunas aplicaciones importantes que utiliza el proceso erosivo, como es el pulido de piezas con chorro de arena.

Estudios modernos han analizado gotas de agua y/o partículas extrañas, producen daños en maquinaria hidráulica, hélices de barcos, entre otros, además existen desarrollos de la nanociencia en función de prevención de desgaste, buscando explicar las causas de desgaste en la Mecánica de Fluidos.<sup>1</sup>

Los recubrimientos desde los años 70' han sido la solución de todos estos problemas mencionados y en las décadas de los 80' y 90' se presentó su mayor desarrollo. Hoy en día ya los recubrimientos han llegado a un nivel tecnológico tan alto que se desarrollan aplicaciones a nivel nanométrico.

El rociado térmico que es un proceso para aplicar recubrimientos, tuvo sus inicios a principios del siglo XX, sus primeras aplicaciones se realizaron para incrementar la resistencia a la corrosión por aplicación de Zinc, sin embargo pese a existir desde aquel entonces solo después de los 60 comenzó un fuerte desarrollo que cambió la naturaleza eminentemente de reparación que tenía el proceso y lo desarrolló para lograr integrarlo al proceso productivo especialmente en partes de aviones y en la industria textilera, con la consiguiente expansión en equipos procesos y productos para realizarlo<sup>2</sup>.

García y Redden en 1998 estudiaron la resistencia al desgaste erosivo con cuatro ángulos de incidencia (15, 30, 60 y 90°) utilizaron un recubrimiento colmonoy 88 mediante el tratamiento de rociado térmico y determinaron que la micro-dureza superficial y la resistencia al desgaste erosivo aumentaron con la aplicación<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Mesa, G. Dairo Hernán. Desgaste de materiales. Universidad Tecnológica de Pereira. Documento en línea. Disponible en: [www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf](http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf), consultado en junio de 2012.

<sup>2</sup> Sager S.A. Memorias de termorociado, documento editado por la empresa

<sup>3</sup> Galarraga g., Michael x. González f., Fernando. Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo de recubrimientos tipo cermet depositados por hvof, 2006

Banguenses y Rodríguez en el año 2.000 en Venezuela, utilizaron dos materiales: WC-12%Co+20% colmonoy 88 y WC-10%Co+4%Cr, que fueron depositados mediante la técnica de rociado térmico con el fin de evaluar la resistencia a la erosión; aplicaron tres diferentes ángulos de incidencia (30, 60 y 90°) siguiendo la norma ASTM G76-83 y determinaron que el recubrimiento WC 12%Co+20%colmonoy88 tuvo mayor resistencia al desgaste erosivo y concluyeron que la micro dureza superficial no se alteraba con la aplicación.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El Ingenio Manuelita S.A utiliza en sus procesos bombas centrífugas Wemco como se observa en la figura 1, aquellas están presentando alto desgaste en sus impulsores, La empresa Sager S.A. que presta servicio de reparación de equipos industriales le presentó el caso al Grupo de investigación Ciencia e Ingeniería de Materiales, GCIM, de la Universidad Autónoma de Occidente, para que estudiaran el caso y presenten una propuesta de solución para incrementar la vida útil del material de los impulsores.

Actualmente, el Ingenio Manuelita realiza un proceso de recuperación parcial del impulsor desgastado por medio de soldadura, lo cual permite que se use la bomba por un período de tiempo más largo, teniendo que repetir el proceso de recuperación periódicamente. Lo que se pretende en este proyecto es estudiar la posibilidad de mejorar la vida útil de un impulsor nuevo de la bomba, en condiciones de desgaste por erosión-corrosión, por medio de un recubrimiento duro aplicado por rociado térmico. Se espera que el recubrimiento aplicado por medio de rociado térmico, mejore las propiedades tribológicas del impulsor, generando un impacto positivo a la empresa, puesto que se reduciría los costos de mantenimiento al no tener que cambiar la bomba con la misma frecuencia y reducir las compras de bombas nuevas, además de la productividad de la empresa por menos paradas de producción.

**Figura 2. Disposición de la bomba Wemco.**





### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el comportamiento frente al desgaste erosivo-corrosivo del acero inoxidable AISI 316, recubierto mediante la técnica de rociado térmico para mejorar su vida útil y aplicarlo a los impulsores de una bomba Wemco.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Preparar probetas de acero inoxidable AISI 316 para la aplicación del recubrimiento duro y aplicar el rociado térmico
- Caracterizar las propiedades tribológicas, morfológicas y evaluar la dureza del recubrimiento duro aplicado al acero inoxidable 316.
- Determinar el desgaste erosivo-corrosivo que sufre el material del impulsor sin recubrimiento y con recubrimiento para comparar la vida útil de cada uno.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 ROCIADO TÉRMICO

El rociado térmico (THSP) es una técnica mediante la cual partículas finamente divididas de materiales metálicos o no metálicos de revestimiento son depositadas en estado fundido o semi-fundido sobre un sustrato para formar un recubrimiento. El material de revestimiento puede estar en forma de polvo, alambre o varilla. El material a termo rociar es calentado y llevado a fusión o a estado plástico mediante una fuente de calor tal como combustión de gases, arco eléctrico, arco plasma o por la detonación de una mezcla explosiva. El material caliente es proyectado hacia el sustrato por una corriente de gases. La mayoría de los metales, cerámicos, cerments y materiales compuestos pueden ser termorociado modificando algunas variables del proceso<sup>4</sup>.

Cuando las partículas fundidas impactan la superficie, se aplastan formando pequeñas lentejas que se entran con las irregularidades de la superficie y entre sí. La adhesión entre el sustrato y el material de revestimiento puede ser mecánica, metalúrgica, química o una combinación de estas. En ocasiones un tratamiento térmico posterior del revestimiento aumenta la resistencia de la adherencia con el sustrato por difusión o reacción química con el sustrato.

### 4.2 ROCIADO TÉRMICO POR COMBUSTIÓN

Cuando la fuente de energía es la combustión existen dos subgrupos:

**4.2.1 Subsónica.** Los sistemas de proyección basados en combustión subsónica, generalmente usan gases tales como acetileno, propano o propileno, junto con oxígeno o simplemente aire para lograr la energía necesaria para fundir el material de aporte, el cual puede estar en forma de polvo o alambre. El empuje necesario para que la partícula logre la velocidad requerida para ser proyectada sobre el sustrato es logrado con los gases de combustión. Es subsónica puesto que dichos gases de combustión solo logran impulsar las partículas a velocidades del orden de 150 a 200 m/seg.

---

<sup>4</sup> Sager S.A. Memorias de termorociado, documento editado por la empresa

**4.2.2 Hipersónica.** Los procesos de combustión hipersónica están divididos en dos grupos, los sistemas de detonación y los sistemas continuos. Los sistemas de detonación operan bajo principios diferentes a los demás sistemas de termo rociado, en ellos una mezcla de gases explosiva, normalmente acetileno y oxígeno se carga con el material de aporte en forma de polvo, el cual es fundido y proyectado sobre el sustrato a través de explosiones sucesivas y rápidas en la cámara del cañón.

Los procesos supersónicos continuos usan Kerosén, propileno, o hidrógeno junto con oxígeno o aire para producir una combustión continua en la cámara de combustión de la cual los gases calientes de combustión son eyectados a velocidades que superan Mach 4, en estos gases se introduce el material de aporte en forma de polvo y es proyectado con tal energía cinética que el impacto sobre el sustrato produce calor adicional que contribuye a mejorar la liga y aumenta considerablemente la densidad del depósito.

### **4.3 ROCIADO TÉRMICO POR ARCO ELÉCTRICO**

En el proceso de “Arc Spray” se usan metales y aleaciones en forma de alambre para producir un arco eléctrico continuo entre dos de ellos, que al fundirlos permite proyectar mediante un chorro gaseoso, generalmente de aire, tal como se muestra en la figura 3, las partículas del material de aporte sobre el sustrato.

**Figura 3. Equipo por arco eléctrico.**



**Fuente: Imágenes editadas por Sager S.A**

## **4.4 ROCIADO TÉRMICO POR MEDIO DE PISTOLA DE PLASMA**

**4.4.1 Plasma transferido.** Se utiliza una pistola especial que tiene la habilidad de producir un arco plasma transferido en el cual se inyectan las partículas del material de aporte en forma de polvo, estas se funden y se ligan metalúrgicamente al sustrato.

**4.4.2 Plasma no transferido.** Mediante una pistola especial se crea un arco plasma entre el electrodo de tungsteno y la boquilla, el cual es usado para fundir y proyectar las partículas del material de aporte introducidas en la corriente de gases en forma de polvo. El arco no toca la pieza y la liga es básicamente por entramamiento mecánico

## **4.5 PROCESO DE EUTALLOY**

Es un proceso de fusión que se realizará con antorchas de fusión multiflora, operados manualmente para aplicar recubrimientos con espesores entre 0.1-3 mm., en una sola pasada y sobre una amplia gama de piezas metálicas utilizando un soplete oxiacetilénico, Figura 4, otros gases se usan pero debido a la necesidad de alcanzar rápidamente las temperaturas de fusión su uso es poco frecuente. Este proceso innovador permite:

- Flujos de gases y polvo optimizados a través de los circuitos internos del soplete.
- Incremento de la tasa de proyección en grandes piezas o de fuertes espesores.
- Mayor control de pequeños depósitos en esquinas y bordes finos.
- Sobreproyección de polvo minimizado y sus costes de eliminación.
- Prolongación de la vida en servicio de las piezas e incremento de la productividad industrial

**Figura 4. Equipo de aspersión y fusión a Gas (Spray & Fuse).**



**Fuente: Imágenes editadas por Sager S.A**

#### **4.6 PARÁMETROS DEL PROCESO EUTALLOY**

Estos equipos funcionan con una mezcla de acetileno y oxígeno como fuente de energía y el material de aporte en forma de polvo. Una pequeña cantidad del oxígeno es desviada a un Venturi para producir la succión necesaria para introducir el polvo desde un depósito colocado en la misma antorcha, esta alimentación es controlada con una válvula manual. El polvo es arrastrado por los gases a través de la boquilla hasta llegar al cono de la llama donde debido a su pequeño tamaño (mesh 140 ) se funde y alcanza la pieza la cual ha sido precalentada por la misma llama produciéndose una liga completamente metalúrgica y con unas características muy similares a las de la soldadura a gas. Los diferentes tamaños de boquilla permiten lograr un control excelente de la geometría de los depósitos, esto hace que sea un proceso ampliamente utilizado en la reconstrucción de moldes<sup>5</sup>.

Las aleaciones utilizadas están en dos grupos principales, a base de Níquel con Cr, B, Si, que son las más usadas y que tienen rangos de dureza de 18 HRC hasta 65 HRC, en algunos casos y para aplicaciones como en el caso del trabajo se añade carburo de tungsteno para aumentar su resistencia a la abrasión y a la erosión. El otro grupo de aleaciones es a base de Cobalto y es usado en general en aplicaciones de alta resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Sager S.A. Memorias de termorociado, documento editado por la empresa

<sup>6</sup> John d. Streeter, Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones, 2011

**Cuadro 1. Recubrimientos de aleaciones metálicas**

<b>Micro-Polvo<sup>7</sup></b>	<b>Características del Deposito</b>	<b>Dureza (HR)</b>
Acero de baja aleación	Generalmente empleado en la restitución de medidas en piezas mal mecanizadas.	90 b
Acero Eutectoide	Depósitos de buena resistencia al desgaste abrasivo, rectificable.	38 c
Acero Inoxidable	Buena resistencia a la corrosión. Excelente mecanizado	17- 24 c
Acero Inoxidable Martensítico Tipo 410	Buena resistencia a corrosión y erosión. Especialmente indicado en reconstrucción de partes de turbinas hidráulicas.	35 c
90% Ni, 10% Al	Aleaciones Exotérmica, empleada como aleación de adhesión.	80 b
Ni-Cr-Mo-Al	Aleación exotérmica de buena resistencia a la corrosión y al desgaste abrasivo.	30 c
5%Ni, 5%Al, 5%Mo	Buena resistencia a la erosión por partículas finas	80 b
Aluminio	Deposito resistente a la corrosión atmosférica.	40-50 b
Aluminio 10% Si	Inferior resistencia a corrosión que al puro, pero mayor dureza	90 b
Zinc	Depósito resistente a la corrosión en ambientes marinos	40-50 b
Cobre	Depósitos empleados como conductores	35-40 b

---

<sup>7</sup> John d. Streeter, Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones, 2011.

**Cuadro 2. Recubrimientos de aleaciones cerámicas**

<b>Micro-polvo<sup>8</sup></b>	<b>Características del deposito</b>	<b>Dureza (HRc)</b>
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alúmina. Excelente resistencia dieléctrica y a la abrasión.	35
$\text{Al}_2\text{O}_3$ -2% $\text{TiO}_2$	Alúmina gris. Depósitos más densos que alúmina pura con antidesgastes a la abrasión y erosión	55
$\text{Al}_2\text{O}_3$ -2% $\text{TiO}_2$	Alúmina-Titania. Depósito denso de excelente resistencia a la corrosión ácida y de alcalies. Excelente terminación por lapeado	60
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Cromita. Resistente a la abrasión, erosión, cavitación y corrosión ácida	60
$\text{ZrO}_2$	Circonia. Resistente al shock térmico y excelente aislante. Buena resistencia a la erosión a elevadas temperaturas	25

**Cuadro 3. Recubrimientos de Cermets**

<b>Micro-Polvo</b>	<b>Características Del Deposito</b>	<b>Dureza (HRc)</b>
70% Ni-Al 30% $\text{Al}_2\text{O}_3$	Depósito resistente a la oxidación y abrasión	45

---

<sup>8</sup> John d. Streeter, Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones, 2011.

#### **Cuadro 4. Recubrimientos de Carburos**

<b>Micro-Polvo<sup>9</sup></b>	<b>Características Del Deposito</b>	<b>Dureza (HRc)</b>
De Tungsteno 20% Ni-Al	Depósito densos, resistentes a la erosión a temperaturas alta	55
De Cromo –15% Ni-Al	Resistencia a la oxidación por altas temperaturas	35

#### **4.7 RECUBRIMIENTO**

Es el recubrimiento que se utilizó para mejorar la resistencia del desgaste erosivo-corrosivo del acero AISI 316. Es una matriz de níquel muy dura que contiene finas partículas de carburos de tungsteno

#### **4.8 DESGASTE**

La tribología como la ciencia que estudia la totalidad de los fenómenos emergentes de superficies que interactúan con movimiento relativo entre sí, en presencia o ausencia de algún medio circundante. A ella se incorporan un gran número de tópicos tales como lubricación, fricción, desgaste y aspectos propios de los materiales. La fricción se genera debido a la presencia de dos cuerpos en contacto, dichas fuerzas dependen de dos parámetros fundamentales como son: el área de contacto (que siempre será más pequeña que las superficies debido a las irregularidades microscópicas de todo material aun siendo visualmente liso) y las propiedades de los materiales en contacto. La rugosidad otorgada a una superficie forma parte de un análisis especial en el cual se deben tomar en cuenta factores como: el maquinado, el tipo de ajuste, la lubricación, la carga y la temperatura de operación, entre otros agentes a los cuales se somete la pieza durante su utilización. Parámetros como el filo de la herramienta de corte, las vibraciones presentes en la máquina herramienta y las pequeñas variaciones en la

---

<sup>9</sup> John d. Streeter, Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones, 2011.



velocidad de avance de la misma, pueden influir de forma notoria sobre el grado de rugosidad de una superficie. Se puede decir que dos superficies nunca serán exactamente iguales por más cuidado que se tenga durante su producción<sup>10</sup>.

El desgaste representa una falla inevitable siempre que existan las condiciones que lo generan. Se considera que el desgaste no ocasiona fallas violentas, por lo tanto las fracturas súbitas no pueden ser consideradas como producto del desgaste, debido a que los materiales más resistentes al desgaste son frecuentemente frágiles y propensos a la fractura.

El desgaste acarrea consecuencias tales como: la reducción en la eficiencia operativa, la pérdida de potencia por fricción, el incremento del consumo de lubricantes, el reemplazo o la reconstrucción de materiales desgastados y la pérdida de las maquinarias.

El desgaste es considerado dentro de un sistema tribológico como todo material removido o indeseablemente desplazado de la superficie de un cuerpo, también es considerado desgaste el desplazamiento de material desde las zonas en contacto hacia las zonas libres de carga dentro del medio en el que trabaja.

**4.8.1 Corrosivo.** Es el producto de la reacción del metal con el medio que trabaja, generando la formación de capas superficiales (películas) u óxidos. Estas películas generalmente son duras y actúan como agentes protectores del material hasta alcanzar valores críticos en los cuales se vuelven frágiles y son removidas para posteriormente hacer que el material repita su ciclo de formación. De esa forma el material pierde capas de forma progresiva y dichas capas a su vez se convierten en elementos causantes de desgaste abrasivo.

**4.8.2 Erosivo.** El desgaste erosivo es un fenómeno que afecta gran cantidad de elementos de máquinas en las industrias minera y alimenticia, así como: turbinas hidráulicas, implementos agrícolas, sistemas de bombeo y dragado en ríos y minas, al igual que piezas específicas usadas en las industrias petrolífera y petroquímica, entre otras muchas aplicaciones. Con este tipo de desgaste, no solo se tiene pérdida de material y la consecuente falla de las piezas, sino que esta

---

<sup>10</sup> Mesa, G. Dairo Hernán Desgaste de materiales, Universidad Tecnológica de Pereira. Documento en línea. Disponible en: [www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf](http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf), consultado en junio de 2012

asociado a perjuicios financieros en virtud del tiempo asociado a la reparación de equipos y substituciones de los componentes deteriorados.

El conocimiento de los mecanismos de remoción de material involucrados durante el desgaste erosivo, así como el reconocimiento y la caracterización de las diferentes variables involucradas, son líneas muy importantes de investigación en la ingeniería actual, así su estudio haya sido comenzado hace ya varias décadas. Varias teorías que intentan entender y relacionar los diferentes mecanismos que actúan durante la erosión, con las variables involucradas, han sido desarrolladas en modelos matemáticos. Estos modelos se basan en hipótesis, que a veces limitan el análisis, ya que son realizados para aplicaciones muy específicas, orientadas a la solución de problemas particulares en procesos industriales. Muchos de estos modelos, aunque basados en líneas de pensamiento coherentes, están siendo actualmente estudiados nuevamente para perfeccionarlos.

Un fenómeno que actúa de forma sinérgica con la erosión, es la corrosión, en general cuando el medio de trabajo es húmedo. La corrosión puede ser definida de acuerdo con literatura, como un fenómeno que deteriora un material (generalmente metálico), por acción química o electroquímica del medio ambiente, asociada o no a esfuerzos mecánicos. La acción combinada de estos procesos, corrosión y desgaste erosivo, resulta en la degradación acelerada de los materiales debido a su comportamiento sinérgico. El proceso de desgaste corrosivo en materiales que forman capas pasivas es acelerado cuando esta capa es débil, como en el caso de algunos aceros inoxidable auténticos<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Mesa, G. Dairo Hernán Desgaste de materiales, Universidad Tecnológica de Pereira. Documento en línea. Disponible en: [www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf](http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf), consultado en junio de 2012

## 5. DETALLES EXPERIMENTALES.

El material utilizado como sustrato fue acero inoxidable AISI 316, utilizado para la fabricación de los impulsores de las bombas Wemco que trabajan en los molinos del Ingenio Manuelita. Se fabricaron probetas de diámetro 15.87 mm, y espesor de 4 mm, en un torno del laboratorio de procesos de manufactura de la universidad Autónoma de Occidente, como se muestra en la figura 5.

**Figura 5. Torno inmotor súper 30 – 550 laboratorio de manufactura UAO.**



Las medidas de las probetas para el ensayo de erosión-corrosión fueron indicadas según diseño y construcción del equipo de corrosión-erosión por el ing. Selwin a. Angarita.

### 5.1 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE PARA LA REALIZACIÓN DEL ROCIADO TÉRMICO

La etapa de preparación de la superficie de las probetas para la aplicación del recubrimiento se dividió en dos procesos:

- Limpieza con Thinner comercial, que se emplea como desengrasante.
- Precalentamiento de las probetas mediante una llama oxiacetilénica, hasta aproximadamente 90 °C durante un minuto, para eliminar la humedad.

## 5.2 PARÁMETROS DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO

El proceso de rociado térmico se realizó en la empresa Sager, se empleó material en polvo mediante una pistola modelo Jet eutalloy 83. En la cuadro 6 se presentan los diferentes parámetros que se deben ajustar al equipo, antes de realizar los recubrimientos. En la Figura 6 se muestra la aplicación del recubrimiento mediante el proceso rociado térmico sobre un grupo de probetas.

**Figura 6. Proceso de rociado térmico.**



**Cuadro 6. Parámetros del proceso de rociado térmico**

Parámetros	Valores
Temperatura de la llama (°C)	1100
Tasa de depósito (kg/h)	2 a 6
Caudal de oxígeno (L/h)	1000
Caudal de acetileno (L/h)	950
Potencia de llama (KW)	14
Espesor del depósito (mm)	2-2,5

Después de aplicar el recubrimiento se apaga la llama y se dejan enfriar las probetas a temperatura ambiente, en la figura 7 se muestra una probeta recubierta.

**Figura 7. Probeta de acero AISI 316 con recubrimiento de carburos de tungsteno.**



### **5.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS**

Para llevar a cabo este proceso se tomaron muestras con recubrimiento. A estas muestras se les realizó una preparación previa, tal y como se explica a continuación:

**5.3.1 Preparación de las muestras para la microscopía.** Se les realizó un corte transversal a una de las muestras, para obtener una vista del recubrimiento junto al sustrato en un plano único. Este corte se llevó a cabo mediante el uso de una cortadora de disco abrasivo, la cual no induce deformaciones y asegura un corte limpio y sin desprendimiento del recubrimiento. En la figura 8 se muestra el equipo de corte empleado.

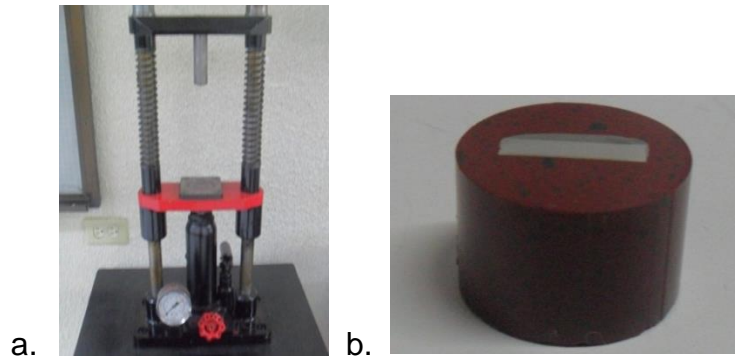
**Figura 8. Cortadora de precisión, laboratorio UAO.**



- Posteriormente se procedió a realizar el proceso de montaje de las muestras en baquelita. El montaje se hizo en caliente vaciando la baquelita en los moldes que

contenían las probetas y se dejó secar a temperatura ambiente. En la figura 9 se muestran las probetas montadas en baquelita.

**Figura 9. Proceso de montaje en baquelita de probetas a. Máquina montadora de probetas, laboratorio UAO. b. Probeta montadas en baquelita.**



- Se pulió la superficie de las muestras montadas en baquelita mediante un equipo de desbaste que permite obtener una condición especular. El equipo consta de un plato rotatorio que emplea como elementos de desgaste lijas de carburo de silicio de diversas granulometrías (240 -1000) y para la obtención del acabado tipo espejo fieltros humedecidos con solución de alúmina como abrasivo. En la figura 10 se presenta el equipo.

**Figura 10. Equipo de desbaste y pulidora, laboratorio UAO.**



**5.3.2 Microscopia óptica.** Se utilizó un microscopio metalográfico marca Olympus modelo pme 3 - 313, que se muestra en la figura 11. Este equipo se utiliza para observar la microestructura de materiales ferrosos y no ferrosos a distintos aumentos, permite determinar las fases presentes en los materiales.

**Figura 11. Microscopio óptico, laboratorio UAO.**



**5.3.3 Microscopía electrónica de barrido.** El análisis con MEB se llevó a cabo mediante un equipo del Centro de Excelencia en Nuevos Materiales de la universidad del Valle, el cual permite realizar ampliaciones hasta 5000x de contrastes composicionales, mediante el uso de electrones primarios, y la topografía de la superficie con electrones secundarios. En la figura 12 se muestra el equipo de microscopía electrónica que fue utilizado para el estudio de las muestras.

**Figura 12. Microscopio electrónico de barrido. Fuente: Laboratorio CENM, Univalle**



**5.3.4 Microdureza.** Para el estudio de la dureza se empleó un micro-durómetro marca Zwick, equipado con un indentador Vickers, que se muestra en la figura 13, se realizaron 8 indentaciones aleatorias y separadas entre sí, para no afectar la medición de la anterior sobre las zonas del sustrato y del recubrimiento. El valor de la dureza se obtuvo con el promedio de las indentaciones y se compararon los resultados con el fin de estudiar la uniformidad de la dureza.

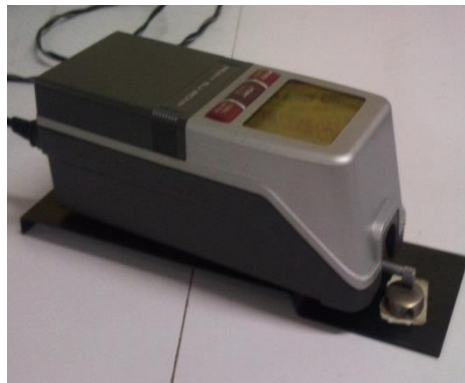


**Figura 13. Micro-durómetro, laboratorio, UAO.**



**5.3.5 Rugosidad.** En la determinación de la rugosidad se empleó un Rugosímetro de contacto marca Mitutoyo modelo SJ 201, el cual reporta un valor denominado  $R_a$ , desviación promedio aritmética del perfil, el cual consiste en el promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias desde la línea media al perfil. En la figura 14 se muestra el Rugosímetro.

**Figura 14. Rugosímetro, laboratorio UAO.**



**5.3.6 Prueba de rayado.** Con el objetivo de analizar la coalescencia que presentan cada uno de los recubrimientos al ser depositados en el material base, es decir la adherencia de cada uno de ellos, y a la vez observar las consecuencias que genera su aplicación utilizando la técnica de desprendimiento del recubrimiento se utilizó la prueba de rayado, Scratch Test, véase figura 15.

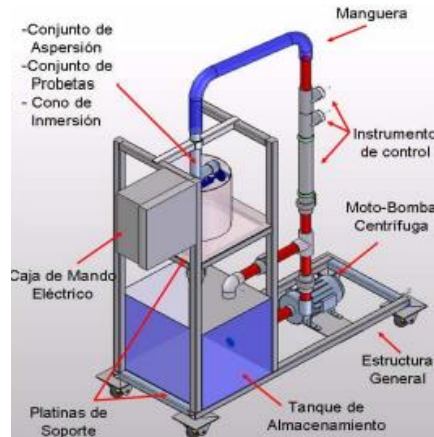


**Figura 15. Equipo de pruebas de rayado, laboratorio GCIM. UAO.**



**5.3.7 Ensayo de erosión – corrosión.** Para este ensayo se utilizó un equipo de erosión-corrosión con una solución de 70% de 0.5M  $H_2SO_4$ , 3.5% de NaCl, y 30% sílice. Este equipo permite controlar la velocidad y el ángulo de impacto de la solución, en la figura 16 se muestra un esquema de la máquina de ensayo erosión-corrosión Patente No. 09-041.125 a nombre de Universidad Autónoma de Occidente N/REF: P-2170.

**Figura 16. Equipo de ensayo erosivo, Laboratorio GCIM, UAO.**



**Fuente: Diseño y construcción de equipo para análisis de erosión-corrosión**

Para la preparación de la superficie de las probetas recubiertas, para el ensayo erosión corrosión se procedió de la siguiente forma:

- Se limpiaron cada una de las probetas utilizando un equipo de ultrasonido marca Cole-Palmer para eliminar los residuos de la superficie. El equipo se muestra en la figura 17.

**Figura 17. Equipo de ultrasonido, laboratorio GCIM. UAO.**



- Se pesó cada una de las probetas mediante el empleo de una balanza analítica con precisión 0.0001 gr amos que se muestra en la Figura 18.

**Figura 18. Balanza analítica, laboratorio GCIM. UAO.**



**5.3.7.1 Prueba de granulometría.** Para la verificación de las condiciones de la arena utilizada para producir erosión, como el porcentaje de humedad retenida y la granulometría se procedió de la siguiente forma:

- El porcentaje de humedad contenida en la arena no debe superar el 0,5% en peso. Para verificar esta condición se tomaron 100 gr. de arena y se colocaron en un horno a 260 °C durante 1 hora, luego se pesó nuevamente la arena y se comprobó que la pérdida de peso de los 100 g iniciales no superaba los 0,5 gr. luego del proceso de secado.
- La granulometría debe ser tal que sus granos posean unas dimensiones que oscilen entre 112 y 312  $\mu\text{m}$ , para la comprobación de este parámetro se procedió a tamizar 50 g de la arena, durante 15 min. Empleando mallas de diversas aperturas mediante una máquina tamizadora, en la Figura 19 se muestra la tamizadora de precisión. Y en el cuadro 7 se evidencia los resultados.

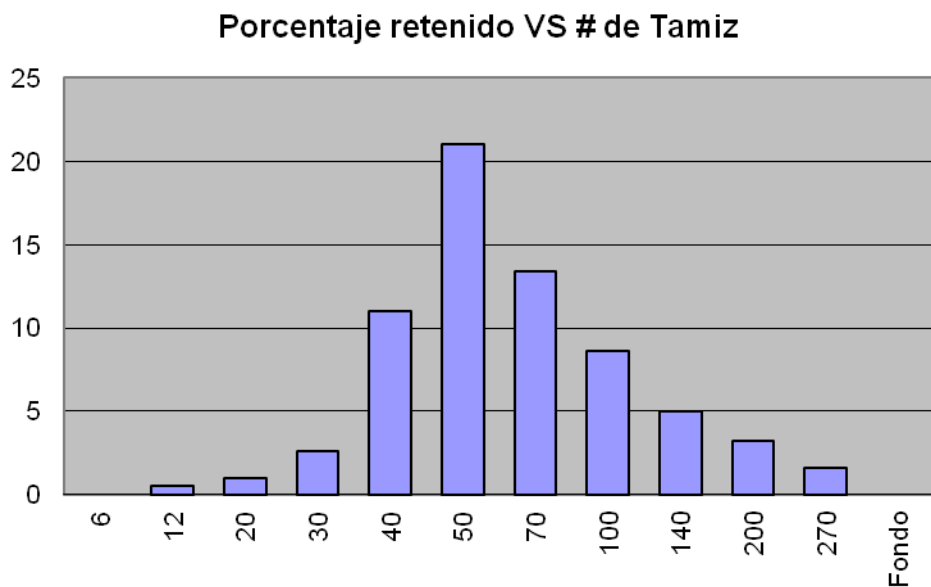
**Figura 19. Maquina tamizadora de arena, Laboratorio UAO.**



**Cuadro 7. Resultados de análisis de granulometría**

No. Tamiz	Apertura malla (mm)	Factor (K)	Peso (gr)	Producto (K*gr)	Porcentaje retenido (%)
6	3,36	3	0	0	0,00
12	1,68	5	0,1	0,5	0,20
20	0,84	10	0,1	1	0,20
30	0,59	20	0,3	6	0,60
40	0,42	30	0,2	6	0,40
<b>50</b>	<b>0,297</b>	<b>40</b>	<b>27,2</b>	<b>1088</b>	<b>54,40</b>
70	0,21	50	20,8	1040	41,60
100	0,149	70	0,3	21	0,60
140	0,105	100	0,1	10	0,20
200	0,074	140	0	0	0,00
270	0,053	200	0	0	0,00
Fondo		300	0	0	0,00
<b>Total</b>			50.0	2.172,5	
Número de finura (AFS No.)		Producto Gramos retenidos		43,45	

**Figura 20. Resultados de análisis de granulometría**



Con los anteriores resultados se puede concluir que la granulometría de la arena es media como se evidencia en el Cuadro 8.

**Cuadro 8. Resultados de análisis de Finura**

<b>Granulometría</b>	<b>Numero de finura (AFS)</b>	<b>Tamaño de grano (mm)</b>
Muy gruesa	Menor de 15	Mayor de 1
Gruesa	15 a 35	1 a 0,5
<b>Media</b>	<b>35 a 60</b>	<b>0,5 a 0,25</b>
Fina	60 a 150	0,25 a 0,1
Finísima	Mayor de 150	Menor de 0,1

**5.3.7.2 Parámetros para ejecución del ensayo.** El tiempo del proceso varió entre 1, 2 y 3 horas; el procedimiento se aplicó con ángulos de ataque de 30°, 45° y 90°. Para la verificación del flujo abrasivo se procedió a chequear constantemente las revoluciones por minuto (RPM) fueran de 2040 rpm lo que indica una velocidad de partícula aproximada a 4.0 m/s y el caudal fuese de 1500 l/h.

Una vez que las probetas se encontraron en las condiciones adecuadas, limpias y secas para la realización de los ensayos, y tanto el equipo como la arena cumplieron con los parámetros normalizados, se procedió a aplicar el método de desgaste especificado por la norma ASTM G65, para ello:

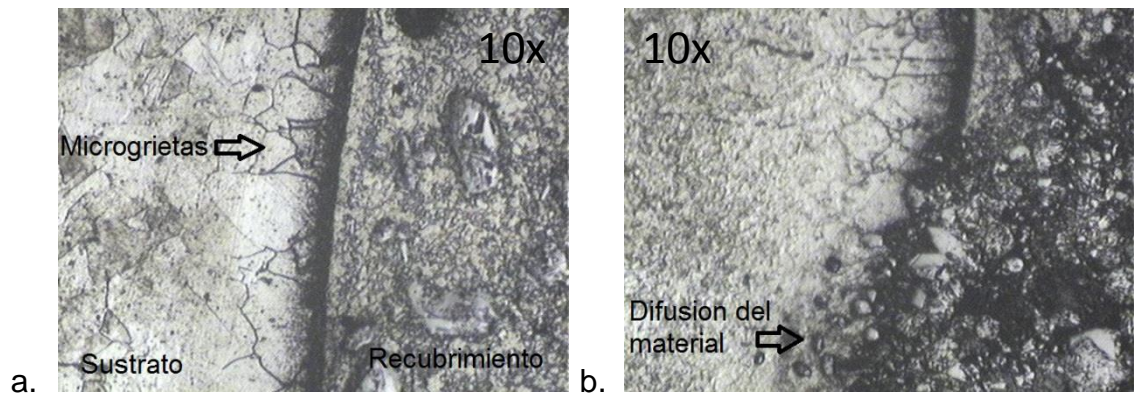
- Se colocó en el depósito el material abrasivo, arena, en el tanque de la máquina de ensayo.
- Se verificó la distancia entre el porta probetas y la salida del abrasivo (4cms).
- Se pesó la probeta en la balanza analítica
- Se colocó la probeta en la porta probetas y se ajustó al ángulo requerido.
- Se puso a punto la bomba hasta llegar a la presión requerida.
- Se dio paso al flujo abrasivo durante un lapso de 1 hora.
- Se retiró la probeta de la porta probetas, se limpió y se secó con secador.
- Se pesó la muestra.
- Los pasos anteriores se repitieron una vez más para los ensayos de 2 y 3 horas.

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS

### 6.1 ANÁLISIS MICROSCOPIA ÓPTICO

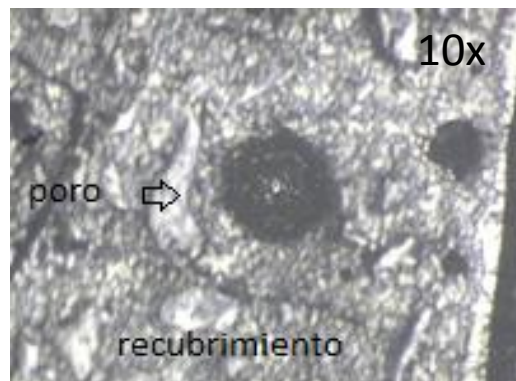
En la figura 21 se presenta micrografías del acero inoxidable AISI 316 con recubrimiento de carburos de tungsteno donde se evidencia la interfase entre el sustrato y el recubrimiento, se aprecia que por proceso de difusión, material del recubrimiento penetró hacia el sustrato lo cual provocó incremento de la dureza en la zona térmicamente afectada e inicios de grietas intergranulares. Se observa en la zona aledaña a la interface que el grano es más grande debido al calentamiento que sufrió durante el proceso.

**Figura 21. Micrografías del recubrimiento sobre acero AISI 316 a 10x**



En la figura 22 se evidencia un poro que se forma en el recubrimiento un efecto que se produce con frecuencia en este tipo de recubrimientos debido a que al proyectar las partículas en el aire son completamente redondeadas, pero al chocar contra el sustrato pueden formar poros debido al enfriamiento antes del choque.

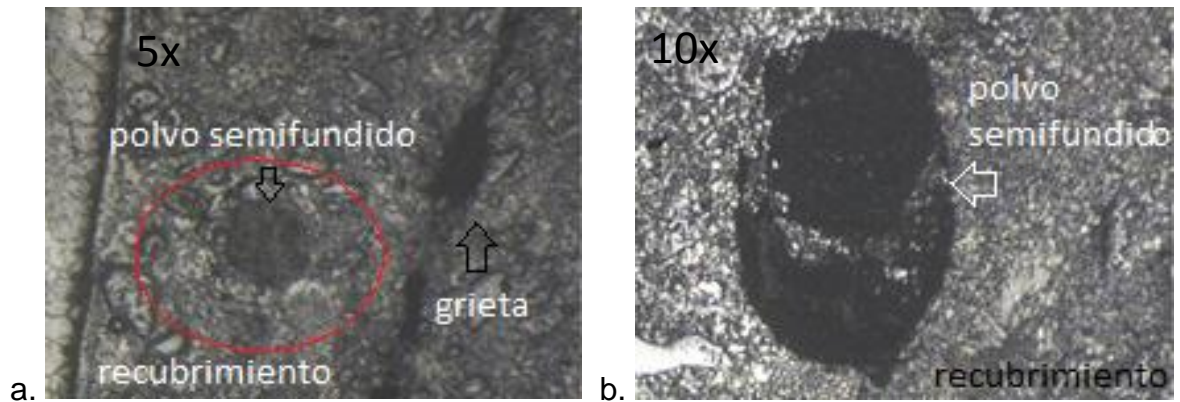
**Figura 22. Micrografía de un poro a 10x**





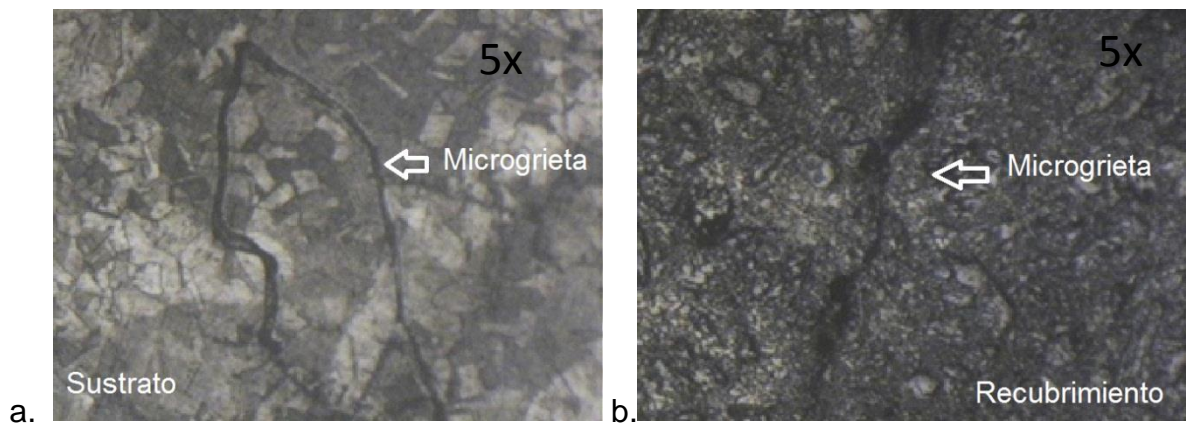
En la figura 23 se observa de forma clara una gota de material semifundido que no logró la coalescencia total con el resto del recubrimiento, por lo tanto queda atrapada en su interior, un fenómeno habitual en este tipo de recubrimientos, posiblemente el material fundido en el recorrido hacia el sustrato logra refrigerarse a tal punto que cuando impacta con la superficie ya no está en su forma líquida.

**Figura 23. Micrografías del recubrimiento a. 5x b. recubrimiento a 10x**



En la micrografía de la figura 24 se observa una grieta en el recubrimiento que se presentan con normalidad en este tipo de recubrimientos, pero la interfase evita que se propague algunas grietas hacia el sustrato; sin embargo en la micrografía de la figura 25 que corresponde al sustrato se observan unas grietas que posiblemente repercutieron de las grietas del recubrimiento.

**Figura 24. a. Micrografía de una grieta en el recubrimiento a 5x b. Micrografía de una grieta en el sustrato a 5x**



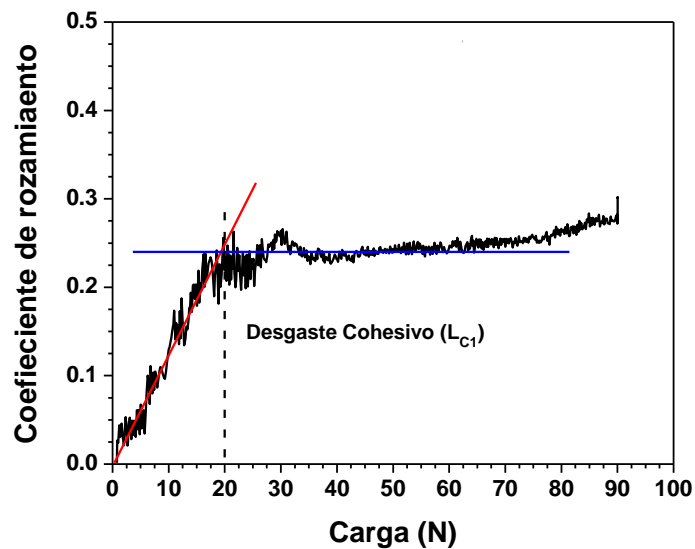
## 6.2 RESULTADOS MICRODUREZA VICKERS

A continuación se presentan los resultados de la Microdureza de cada uno de los recubrimientos y del Acero. Estos valores son el resultado del promedio de 8 indentaciones realizadas sobre el área del recubrimiento, distanciadas entre sí 100  $\mu\text{m}$ . Los carburos de tungsteno presentaron dureza promedio de 1134 HV, la matriz de níquel 930 HV en promedio y el sustrato de acero inoxidable AISI 316 presentó 22 HRc en promedio de dureza.

## 6.3 RESULTADOS PRUEBA DE RAYADO

En la Figura 25 se presenta el comportamiento del coeficiente de rozamiento en la prueba de rayado a la probeta con recubrimiento. Se observa que a aproximadamente 20 N se presenta la carga crítica donde se evidencia el desgaste cohesivo

**Figura 25 Grafica de coeficiente de rozamiento versus carga aplicada en la prueba de rayado**



En la micrografía MEB de la figura 26 se revelan algunas **fallas cohesivas** en el recubrimiento, se aprecia alta deformación elásto-plástica en las fronteras de la huella.

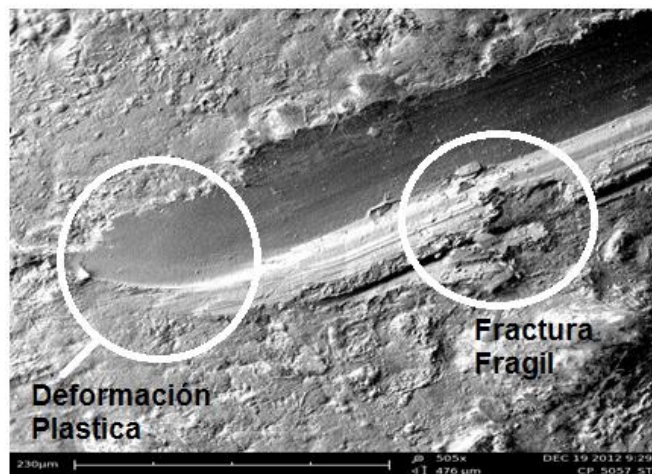


**Figura 26. Micrografía de la huellas sobre el recubrimiento depositado sobre acero AISI 316 evidenciado falla cohesiva**



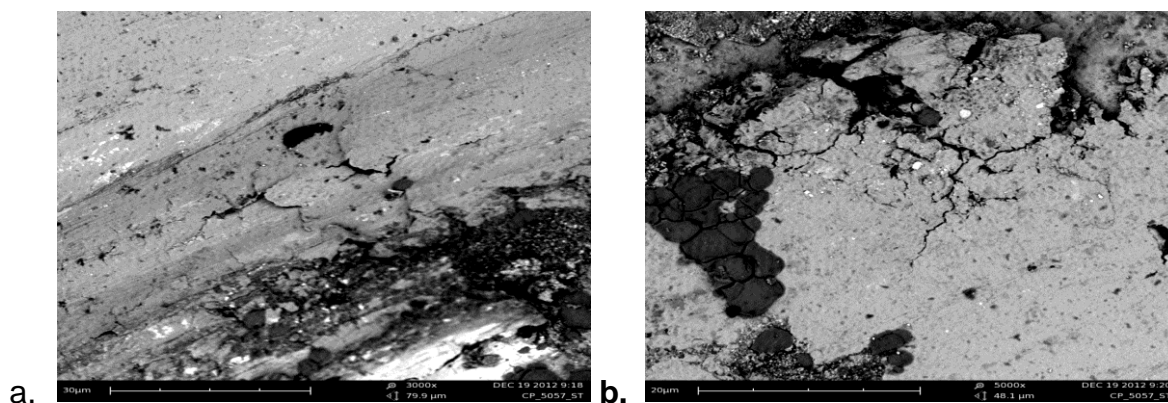
La figura 27 presenta la micrografía del recubrimiento sobre el acero AISI 316, se evidencia el efecto elastoplástico porque en los costados de la huella de desgaste, un fenómeno de disipación de energía por la alta dureza del recubrimiento debido a que se observa fractura frágil y al final de la huella se observa una deformación plástica permanente, característico de un material dúctil, posiblemente de la matriz del recubrimiento

**Figura 27. Micrografía de la huellas de rayado sobre el recubrimiento depositado sobre acero AISI 316**



Las micrografías de la figura 28 a y b corresponden al recubrimiento de carburos de tungsteno donde se revelan grietas generadas en el costado lateral del rayado, se observa también fallas debido a la acumulación de tensiones en los bordes de la huella

**Figura 28. Micrografías de la huellas sobre el recubrimiento depositado sobre sustrato de acero AISI 316 evidenciado grietas.**



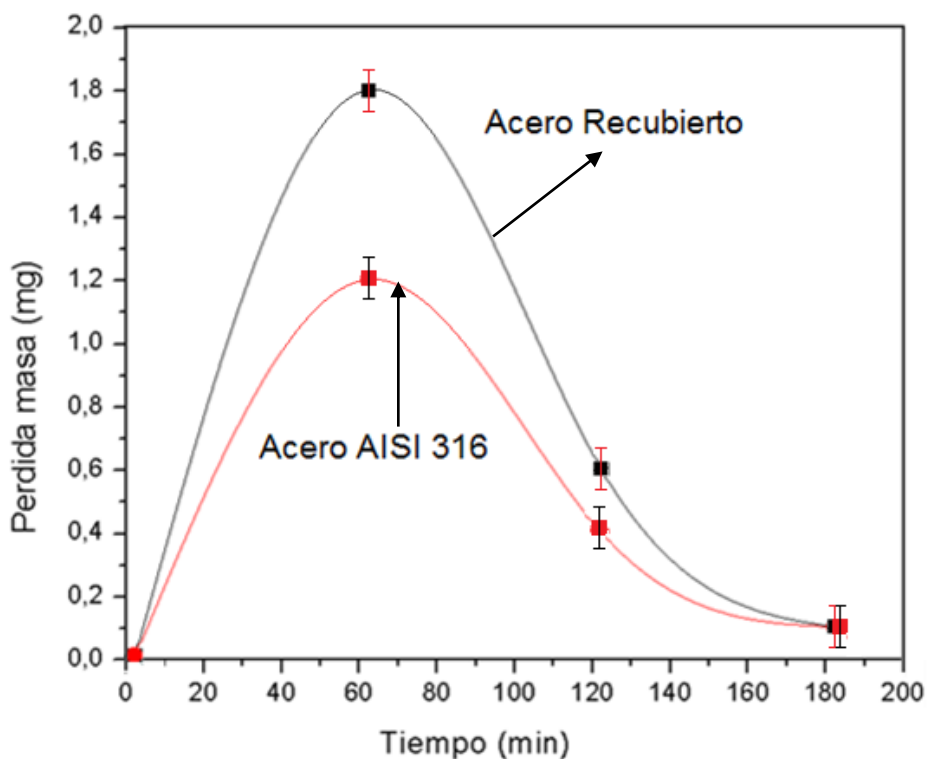
## 6.4 RESULTADOS ENSAYO EROSIÓN-CORROSIÓN

Se realizó la prueba de erosión-corrosión a los recubrimientos mediante el equipo de pruebas del laboratorio GCIM, se utilizó una solución acida de 1/2M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 3.5%NaCl + 30% de peso en Sílice para impactar las probetas, el tiempo de exposición fue de 3 horas y se varió el ángulo de impacto entre 90°, 30°, y 45°. En la tabla 9, se presentan los resultados del porcentaje de pérdida de masa de las probetas ensayadas con recubrimiento y sin recubrimiento. Los valores presentados en la tabla, representan el promedio de 3 mediciones.

**Cuadro 9. Pérdida de masa a 3 horas de ensayo con ángulo de impacto de 90°**

Material	Pérdida de masa (mg)			Angulo de Impacto
	1 h	2 h	3 h	
<b>Recubrimiento</b>	1.8 +/- 0.4	0.6 +/- 0.4	0.117 +/- 0.3	90°
<b>Acero</b>	1.2 +/- 0.5	0.4 +/- 0.4	0.106 +/- 0.4	

**Figura 29. Grafica de Pérdida de masa a 3 horas de ensayo y 90° de impacto**



**Cuadro 10. Rugosidad a 3 horas de ensayo con ángulo de impacto de 90°**

Material	Rugosidad (Ra) (μm) +/- 0.15						Angulo de impacto
	1 h		2 h		3 h		
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	
Recubrimiento	6.53	5.75	5.75	5.60	5.60	5.58	90°
Acero 316	0.46	0.67	0.67	1.11	1.11	1.49	

En la figura 29, se presenta un máximo en la curva lo que indica mayor pérdida de masa cerca del 60% del total de las tres pruebas, a partir de este máximo la curva presenta un comportamiento estable.

El impacto normal de las partículas, modifica las constantes elásto-plásticas en la superficie del material lo cual genera transformación de un material dúctil a frágil por endurecimiento producido por impacto.

- La tasa de desgaste en materiales dúctiles es mínima, es el caso del acero inoxidable que, cuando la partículas lo impactaban repetidas veces con ángulo de 90°, se presentó deformación plástica y la pérdida de material fue insignificante.
- El desgaste en materiales frágiles como el recubrimiento al impactarlo con ángulo de 90° presenta mayor desgaste del material debido a que el impacto genera desprendimiento laminar sobre la superficie del recubrimiento, la pérdida de material se produce principalmente al iniciar el asentamiento y generalmente ocurre en la primera hora del ensayo.
- El desgaste en el recubrimiento sometido al ataque erosivo-corrosivo a 2 horas con ángulo de impacto a 90° tuvo la mayor pérdida de masa comparado con ángulos de 45° y 30° en el mismo tiempo de duración.

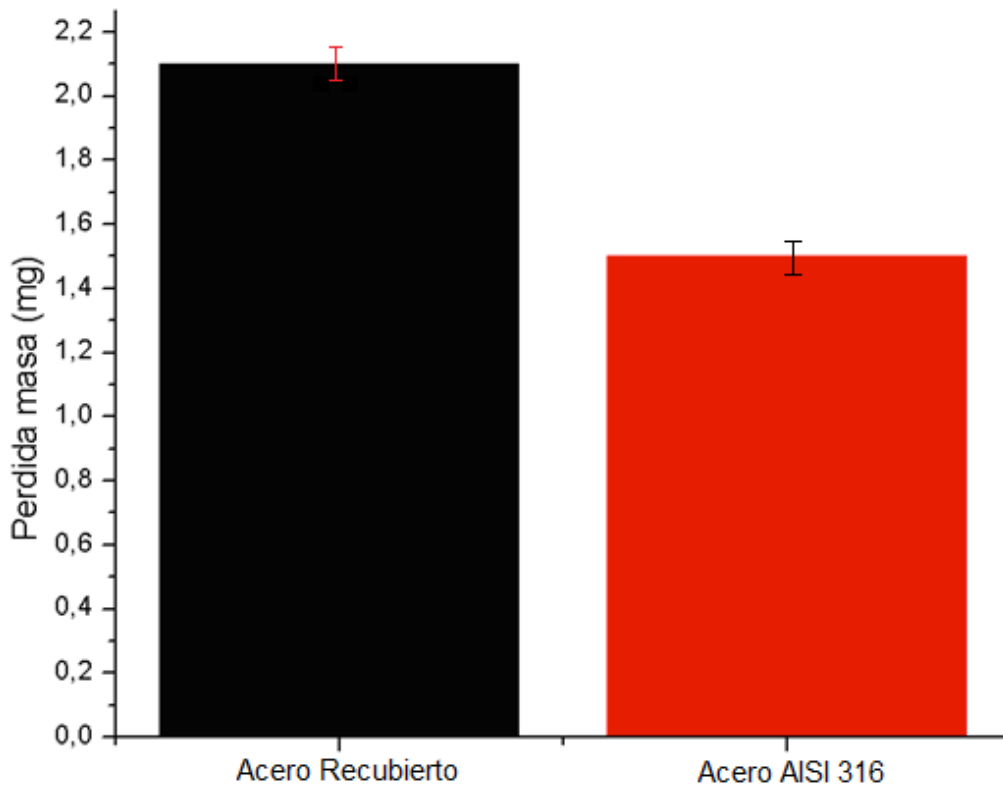
Los resultados iniciales mostraron que el recubrimiento en la primera hora del ensayo con ángulo de impacto a 90°, pierde mayor cantidad de material debido a que se presenta una reducción de rugosidad en la superficie, en un diferencial  $\Delta R_a = 0.78 \mu m$ , que es casi el 82% de la rugosidad medida en las 3 horas, mientras que el acero AISI 316 se deforma plásticamente por ser un material dúctil que tiene una amplia zona plástica lo que produce incremento de la rugosidad cada hora, los resultados de pérdida de masa a 45 y 30° en un tiempo de 2 horas de ensayo, se presentan en las tablas 11,13 y las figuras 30 y 31, respectivamente. Los resultados de las rugosidades se encuentran en los cuadros 12 y 14.

**Cuadro 11. Pérdida de masa a 2 horas de ensayo con ángulo de impacto de 45°**

Material	Pérdida de masa (mg)	Angulo de Impacto
	2 h	
Recubrimiento	2.1 +/- 0.5	45°
Acero	1.5+/- 0.4	

Cuando se analizan los resultados del impacto de partículas con ángulos de incidencia menores o iguales a 45° ocurre el desgaste por corte o arado y deformación plástica para materiales dúctiles. Se puede deducir que en materiales frágiles se presenta mayor tasa de desgaste cuando las partículas inciden a 90°, para ángulos de incidencia iguales o menores a 45° la tasa de desgaste se reduce.

**Figura 30. Gráfica de Pérdida de masa a 2 horas de ensayo y 45° de impacto**



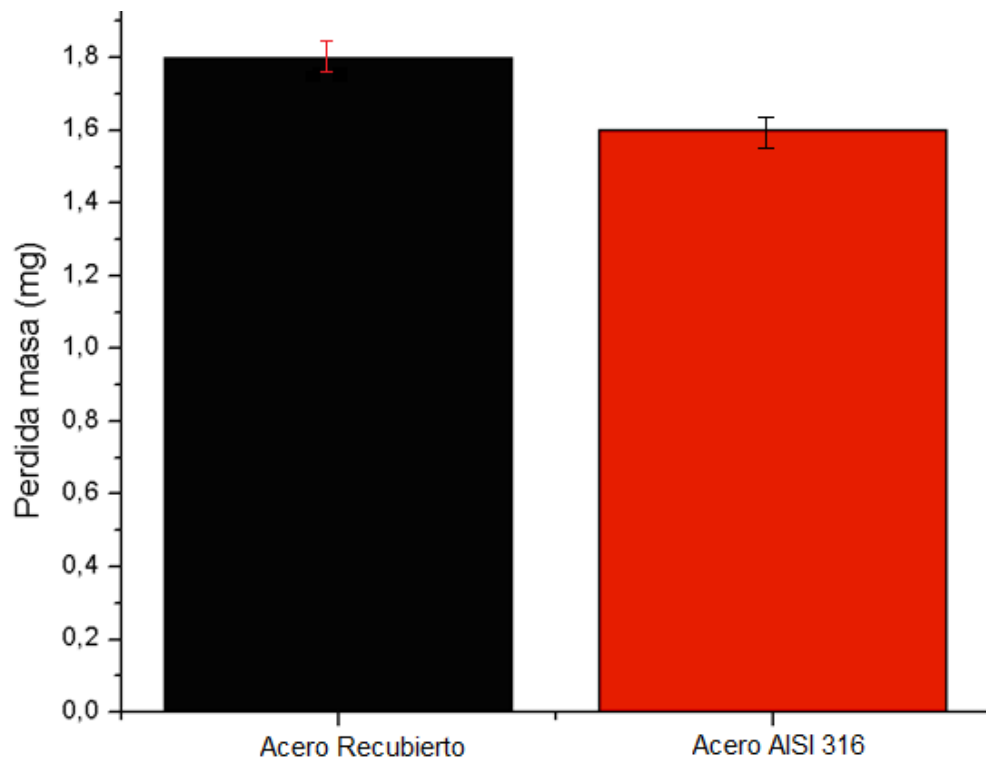
**Cuadro 12. Rugosidad a 2 horas de ensayo con ángulo de impacto de 45°**

Material	Rugosidad (Ra) (µm) +/- 0.15		Angulo de impacto
	Antes de 2 h	Después de 2 h	
Recubrimiento	6.20	5.06	45°
Acero	0.49	0.67	

**Cuadro 13. Pérdida de masa a 2 horas de ensayo con ángulo de impacto de 30°**

Material	Pérdida de masa (mg)	Angulo de Impacto
	2 h	
Recubrimiento	1.8 +/- 0.5	30°
Acero	1.6 +/- 0.4	

**Figura 31. Gráfica de Pérdida de masa a 2 horas de ensayo y 30° de impacto**

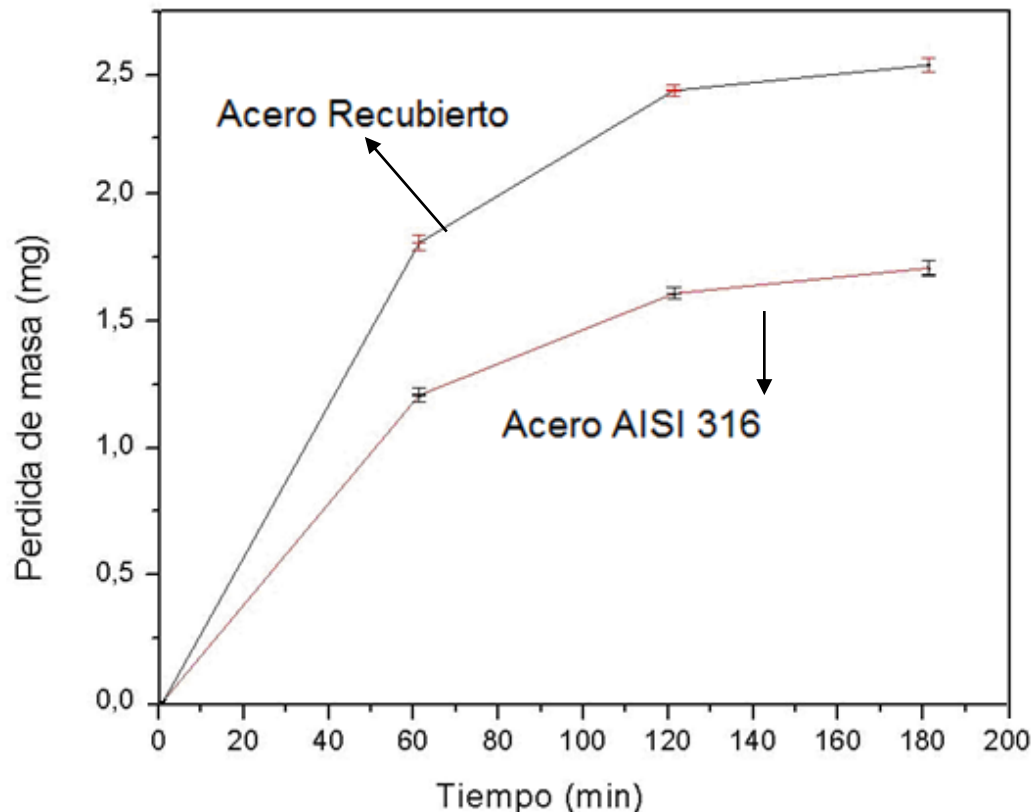


**Cuadro 14. Rugosidad a 2 horas del ensayo con Angulo de impacto de 30°**

Material	Rugosidad (Ra) (μm) +/- 0.15		Angulo de impacto
	Antes 2 horas	Después 2 horas	
Recubrimiento	6.6	6.08	30°
Acero	0.43	0.7	

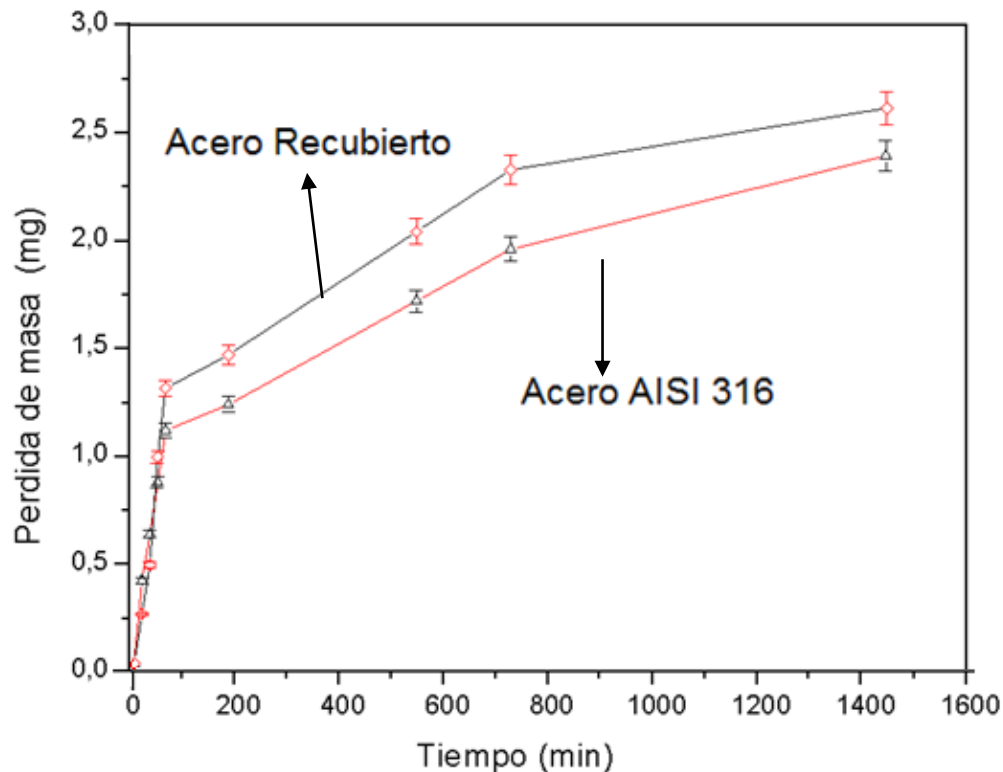
Se compararon los resultados de pérdida de peso obtenidos en el equipo de la Universidad Autónoma de Occidente con los resultados de un equipo erosión-corrosión de la universidad Militar de Colombia y se estableció que fueron muy similares como se observa en la figura 32 y 33, donde se observa que el acero inoxidable presento menor desgaste.

**Figura 32. Grafica de pérdida de masa, equipo de Laboratorio GCIM, UAO**



Este hecho confirma el comportamiento encontrado en estos recubrimientos para las curvas de polarización de la figura 34, donde las densidades de corriente de corrosión son tan altas como las que presenta el acero con recubrimiento permite decir que es el que sufre más desgaste. Esto se puede atribuir a que además de los mecanismos de corrosión se puede sumar otro tipo de ataque, de las partículas erosivas que aumentaron el desgaste. Aquí, se puede corroborar la eficiencia del acero inoxidable para resistir al ataque corrosivo, en la gráfica también se observa la resistencia de los materiales expuestos a la corrosión y al efecto sinérgico.

**Figura 33. Grafica de pérdida de masa versus tiempo. Equipo de laboratorio Universidad Militar de Colombia.**



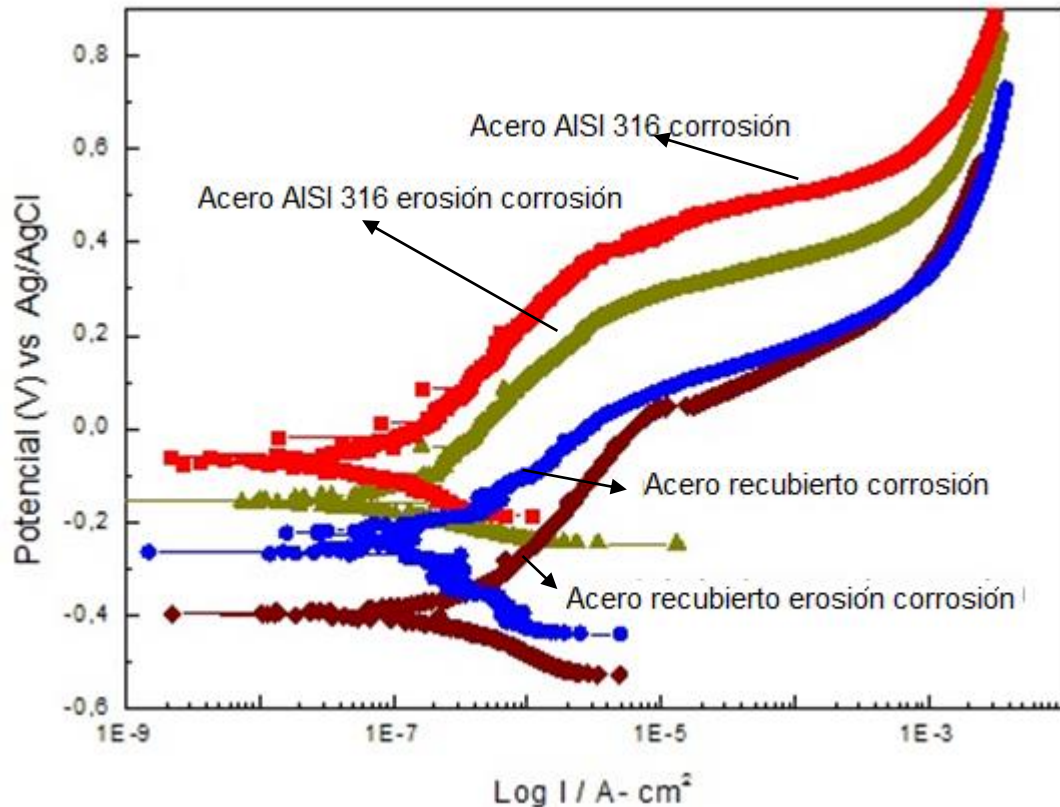
Se conoce del excelente comportamiento que exhiben los aceros inoxidable frente a la corrosión y las capas cerámicas que contienen elementos como níquel o cromo debido a la capa de óxido protectora que pueden formar sobre su superficie en presencia de medios corrosivos. Sin embargo, cuando la sustancia agresiva contiene partículas erosivas, estas capas de óxidos son seriamente dañadas debido a la gran cantidad de choques sobre su superficie, hecho que implica una nueva formación de la capa de óxido, a su vez un mayor consumo del metal y una gran degradación mecánica que provee sitios de preferencia al medio corrosivo para actuar de manera localizada<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Aperado, William. 'Mejoramiento de la resistencia a la corrosión del acero AISI 4140 utilizando multicapas de titanio/nitruro de titanio, 2008



Es por este motivo que la acción sinérgica que presenta el medio corrosivo con las partículas erosivas, da mayor resistencia al desgaste en el acero inoxidable (Patrón de comparación) y en la capa del recubrimiento de carburos de tungsteno, lo que conlleva a una mayor pérdida de material pero igual presenta un buen comportamiento frente al desgaste erosivo-corrosivo.

**Figura 34. Curvas de polarización dinámicas del ensayo de corrosión y corrosión-erosión con ángulo de impacto de 90°**

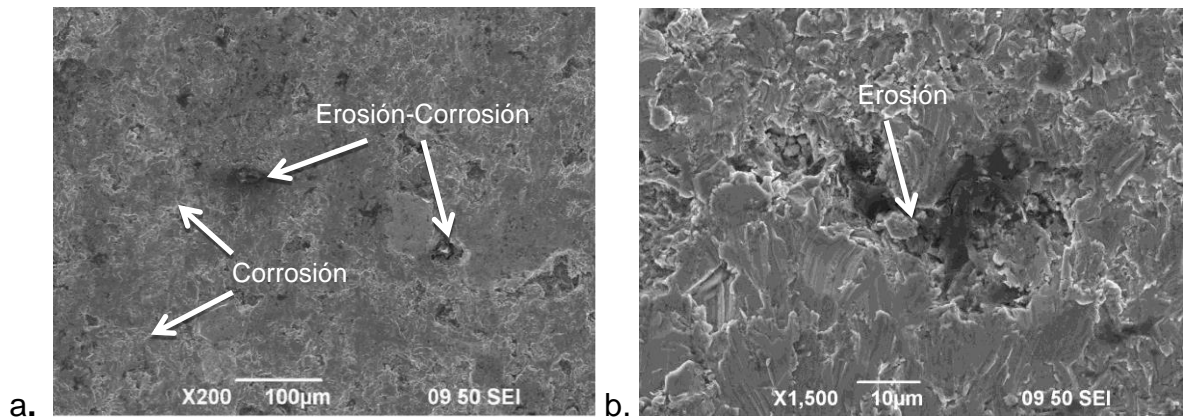


## 6.5 ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Por medio de la técnica de Microscopia electrónica de barrido (MEB) se procedió a realizar un estudio de la superficie en las probetas ensayadas, por erosión-corrosión, obteniendo así una serie de imágenes ilustrativas del daño originado por el abrasivo sobre los materiales ensayados. En las figuras 35, 37 que muestran las superficies de las probetas con recubrimiento, y la figura 36 que muestra el Acero en su estado de suministro. Estas imágenes se muestran ampliaciones de 200X y 1500X, para un ángulo de 30° y 90° a tiempo de 2 y 3 horas respectivamente.

A continuación se muestra los resultados del MEB realizados a la probeta con recubrimiento a 30° en tiempo de duración de 2 horas, tan solo se observa una pequeña dispersión de cráteres, condición que no generó un desgaste considerable como se observa en la Figura 35.

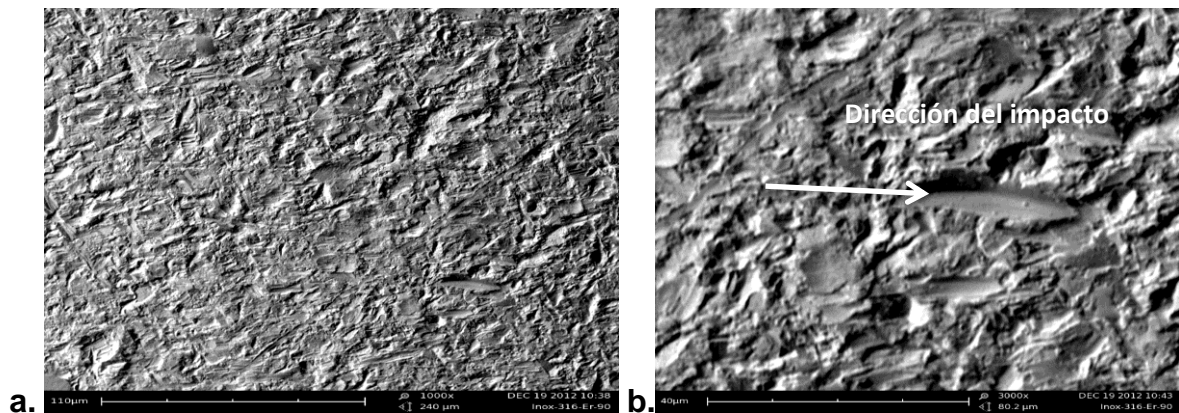
**Figura 35. Micrografía del recubrimiento a 30° en tiempo de 2 horas de impacto**



En la Figura 36 se muestra los resultados del MEB realizados a la probeta del acero Inoxidable a 30° con ataque de 2 horas, condición que genera el mayor desgaste en materiales dúctiles tal como el Acero AISI 316, además, se observa parte del material que ha sido desplazado (micro-corte) por el tipo de impacto recibido<sup>13</sup>

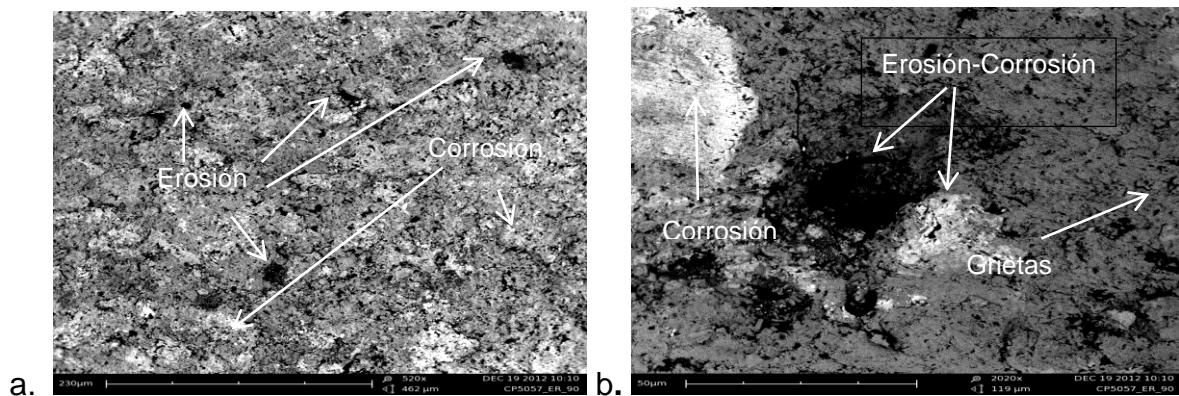
<sup>13</sup> Mesa, G. Dairo Hernán. Desgaste de materiales. Universidad Tecnológica de Pereira. Documento en línea. Disponible en: [www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf](http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf), consultado en junio de 2012.

**Figura 36. Micrografía del acero AISI 316 a 30° en tiempo de de 2 horas de impacto**



En la Figura 37 a y b. se muestra los resultados del MEB realizados a la probeta con recubrimiento a 90° con 3 horas de ataque, condición que generó el mayor desgaste a la probeta con recubrimiento. Se observa que la zona evidencia corrosión generalizada que se distribuye la mayor parte de la superficie, mientras la erosión en puntos localizados.<sup>14</sup>

**Figura 37. Micrografías del recubrimiento a 90° en tiempo de 3 horas de impacto**



<sup>14</sup> William Aperador, Resistencia al desgaste erosivo corrosivo de aceros austeníticos fermanal, diciembre 2012

## 7. CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento al desgaste erosivo-corrosivo del acero inoxidable 316, recubierto con el material por rociado térmico, mostró que es favorable para aplicar en los impulsores de las bombas Wemco porque permitirá conservar por más el tiempo la geometría de diseño del álabe y a su vez aumentar su vida útil.

Se observó que los mecanismos de desgaste debido a la sinergia erosión-corrosión, que se presentaron en el recubrimiento y en el acero fueron diferentes. Mientras que en el acero se presentó el mecanismo de deformación plástica y micro-corte, típico de materiales dúctiles que se podría explicar por el aumento de la dureza y la rugosidad, y en el recubrimiento la remoción de material se debió a la formación de cráteres y grietas, ocasionado por su alta dureza y fragilidad.

El desgaste por pérdida de masa presentado en el recubrimiento en las condiciones más exigentes de ángulo de impacto de  $90^\circ$ , fue de 2.4 mg, mayor que en el acero inoxidable que fue de 1.6 mg, a medida que se redujo el ángulo de impacto la pérdida de masa del recubrimiento fue menor 1.8 mg, mejora del 25 %, lo que indica que a ángulos de impacto pequeños el recubrimiento se comporta mejor, lo cual es favorable durante el funcionamiento de la bomba, puesto que es poco probable que el impulsor reciba impacto con ángulo normal.

## **8. PERSPECTIVAS**

El grupo de investigación GCIM continuará con la investigación del tema, realizando las pruebas de campo, mediante un trabajo de grado, que consistirá en colocar a funcionar las bombas Wemco con el impulsor del Ingenio Manuelita con recubrimiento y sin recubrimiento para determinar la vida útil de estas bombas.

## BIBLIOGRAFIA

APERADOR, William. Mejoramiento de la resistencia a la corrosión del acero AISI 4140 utilizando multicapas de titanio/nitruro de titanio, Bogota, diciembre 2008.

APERADOR, William. Resistencia al desgaste erosivo corrosivo de aceros austenítico fermanal, Bogota, diciembre 2012.

ANGARITA C. Selwin Andrés, Diseño y construcción de equipo para análisis de corrosión, Universidad Autónoma de Occidente, 2006.

CAICEDO, Julio. Bilayer period effect on corrosion–erosion resistance for [TiN/AlTiN]<sub>n</sub> multilayered growth on AISI 1045 steel Bogota, 2009.

CAICEDO, Julio. Effect of applied bias voltage on corrosion-resistance for TiC<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> and Ti<sub>1-x</sub>N<sub>b</sub>C<sub>1-y</sub>N<sub>y</sub> coatings, Bogota, 2008.

CAICEDO, Julio. Enhancement of mechanical and tribological properties in AISI D3 steel substrates by using a non-isostructural CrN/AlN multilayer coating, Bogota, 2007.

ECHEVERRY G. Jorge Hernán. Mejoramiento de la vida útil de elementos de máquinas mediante recubrimientos duros depositados por rociado térmico, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, 2012

GALARRAGA g., Michael x. González f., Fernando, Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo de recubrimientos tipo cermet depositados por hvof, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2006.

JOHN D. STREETER, Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones, 2011.

MESA, G. Dairo Hernán. Desgaste de materiales. Universidad Tecnológica de Pereira. Documento en línea [consultado el 20 Agosto de 2012]. Disponible en internet: [www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf](http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf).

MUÑOZ, Jorge y Coronado, John. Análisis mecánico y tribológico de los recubrimientos Fe-Cr-Ni-C Y Ni-Al-Mo. Revista Dyna 74, nro. 153, pp. 111-118. Medellín, noviembre de 2007.

Sager S.A. Memorias de termorociado, documento editado por la empresa Sager, 2002.

Ronald m. Gómez Angarita. Estudio del comportamiento a desgaste erosivo de recubrimientos wc-co micro y nano estructurados, diciembre 2009

VINAY.Pratap, SINGH, Anjan Sil, R. Jayaganthan. A study on sliding and erosive behaviour of plasma sprayed coatings, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Instituto Indio de Tecnología de Roorkee, Roorkee 247 667, India, 2010.